

УДК 551.21, 553.078.2

## СОСТАВ ПЕПЛА ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ (ИЗВЕРЖЕНИЕ 2017 г.)

© 2017 С.Н. Рычагов, Е.И. Сандимирова, А.В. Сергеева, И.А. Нуждаев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
683006; e-mail: rychn@kscnet.ru*

На основании комплексных исследований получены данные о гранулометрическом, химическом и минеральном составе пепла вулкана Камбальный, извержение которого произошло в марте–апреле 2017 г. Установлено, что пепел является резургентным и состоит из гидротермально измененных андезитов Камбального хребта, подстилающих вулкан. Предполагается, что сейсмическая подготовка к извержению и эксплозивное извержение вулкана Камбальный в 2017 г. обусловлены активизацией газо-гидротермальных процессов в породах фундамента Камбального хребта.

*Ключевые слова:* вулкан Камбальный, хребет Камбальный, эксплозивное извержение, пепел, состав.

### ВВЕДЕНИЕ

25 марта 2017 г. (по местному времени) началось эксплозивное извержение вулкана Камбальный, расположенного на юге Камчатского полуострова. За трое суток до извержения, с 22.03.17 г., Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» в районе вулкана и одноименного хребта был зафиксирован рой землетрясений на глубине 5–6 км от уровня моря (<http://www.emsd.ru>). Землетрясения прекратились 26.03.17 г., через сутки после начала извержения. Извержение протекало в форме эмиссии газа и пепла из вершинного кратера (рис. 1 на 1 стр. обложки) и завершилось 9 апреля 2017 г. Более подробно хронология извержения вулкана Камбальный в марте – апреле 2017 г. приводится в сообщении (Гирина и др., 2017). Это событие является неординарным, особенно в связи с длительным «молчанием» вулкана и отсутствием точных сведений о его исторических извержениях (Влодавец и др., 1957; Гущенко, 1979; Дитмар, 1901; Заварицкий, 1940, 1955; Крашенинников, 1994; Новограбленов, 1932; Рудич, 1978; Рычагов, 2008; Стеллер, 1999; и др.). Кроме того, вулкан, а также южная часть хребта Камбального, слабо изучены. С целью получения новых данных о строении вулкана и очагов генерации энергии, которая вызвала эксплозивное извержение в 2017 г., авторами настоящей статьи изучены грануломе-

трический, химический и минеральный составы пепла вулкана Камбальный.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВУЛКАНА

Камбальный представляет собой голоценовый стратовулкан и относится к действующим (Влодавец и др., 1957; Гущенко, 1979; Келль, 1928). Вулкан имеет следующие морфометрические характеристики: абсолютная высота 2161.4 м, размеры основания постройки  $\sim 8 \times 12$  км, площадь 85 км<sup>2</sup>, объем постройки 9 км<sup>3</sup> ((Литасов, Важеевская, 1991) с уточнениями). Стратовулкан замыкает с юга субмеридионально вытянутый хребет Камбальный (рис. 2), который описывается как резургентное тектоно-магматическое поднятие средне-верхнечетвертичного возраста в паузетской вулcano-тектонической депрессии (Долгоживущий ..., 1980; Структура ..., 1993). Вулкан сложен чередующимися потоками шлаковидных и массивных базальтов, агломератовых лав и пирокластических отложений – все основного состава (Сывороткин, 1993). Согласно тефрохронологическим исследованиям, вулкан начал формироваться в раннем голоцене, наиболее поздняя пирокластическая имеет возраст примерно 600 лет (Ponomareva et al., 2006). Соотношение лав и пирокластиков – от 1:2 до 1:3 и более, типичное для базальтовых стратовулканов (рис. 3). Современные лаво-пирокластические отложения

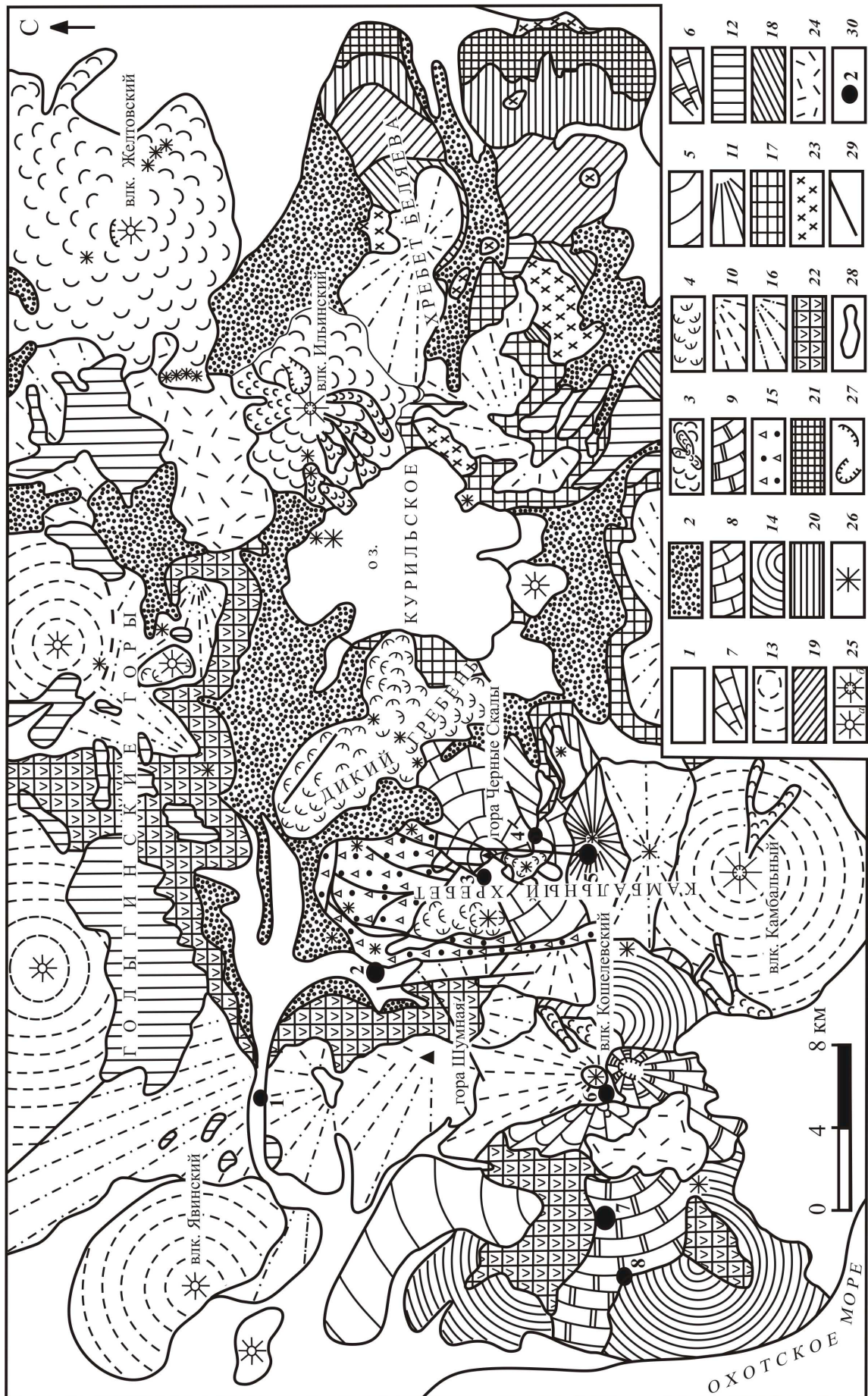
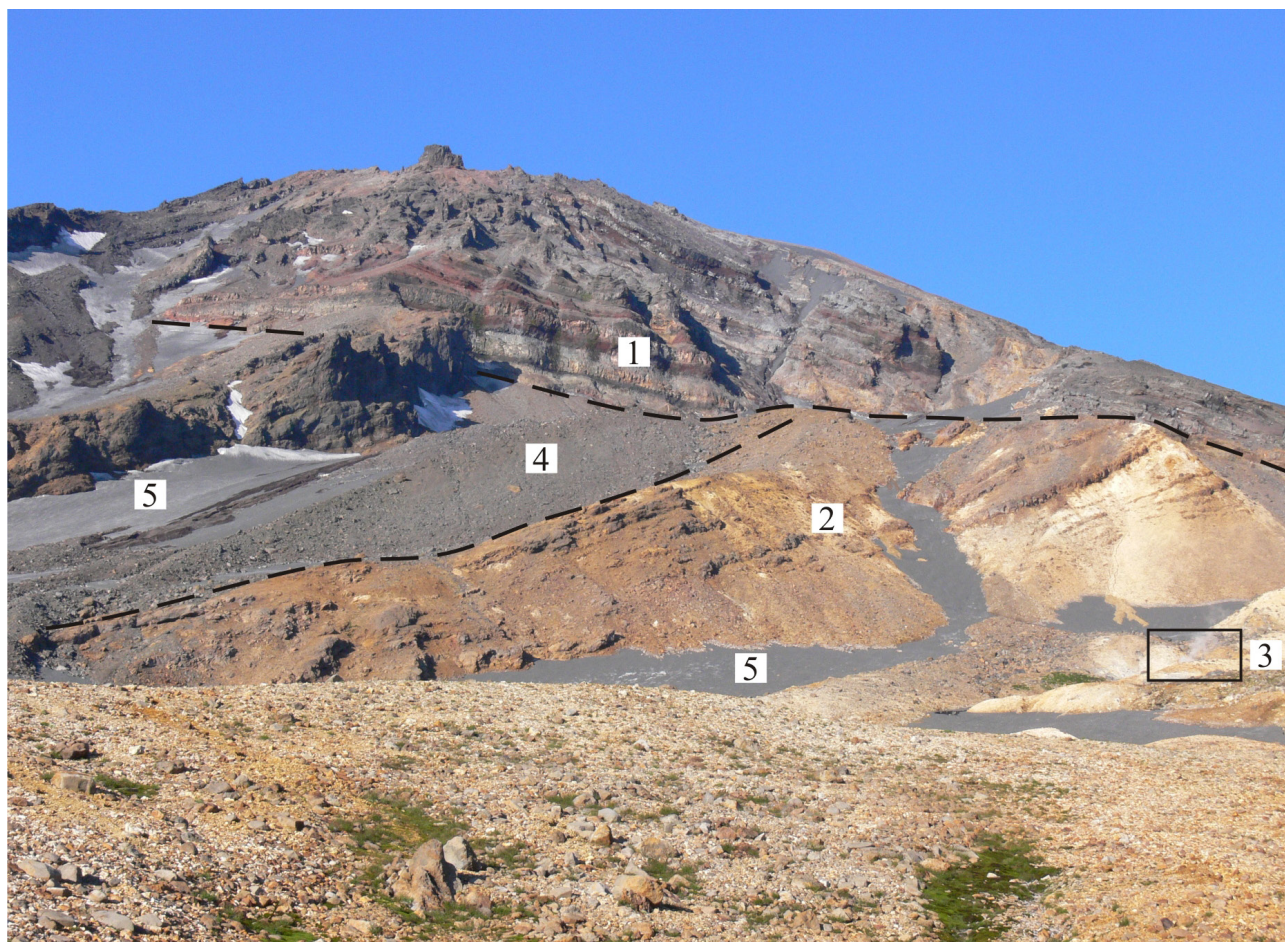


Рис. 2. См. на стр. 15.





**Рис. 3.** Геологическое обнажение-разрез вулкана Камбальный на северо-восточном склоне конуса: 1 — голоценовые базальтовые лавы и пирокластические отложения, 2 — гидротермально измененные плейстоценовые отложения, 3 — место расположения остывшего фумарольного и современного термального поля, 4 — обвалы, 5 — снежники, засыпанные пеплом извержения 2017 г. Фото С.Н. Рычагова.

**Рис. 2.** Схематическая геологическая карта Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района ((Белоусов, 1978), с редакционными изменениями). 1–3 — голоценовые отложения: 1 — аллювиальные, пролювиальные и ледниковые, 2 — пирокластические пемзовые, 3 — базальты и андезибазальты действующих вулканов и отдельные потоки лав; 4–6 — верхнеплейстоцен-голоценовые отложения: 4 — дацитовые и риолитовые экструзивные куполы и их лавовые потоки, 5 — андезиты Восточно-Кошелевского вулкана, 6 — андезибазальты Центрально-Кошелевского вулкана; 7–8 — верхнеплейстоценовые отложения: 7 — андезиты вулкана Валентин, 8 — андезибазальты вулкана Черные Скалы; 9–12 — среднеплейстоценовые отложения: 9 — андезиты Западно-Кошелевского вулкана, 10 — базальты Древне-Кошелевского вулкана, 11 — андезибазальты Камбального хребта, 12 — игнимбриты и спекшиеся туфы риодацитов и риолитов Голыгинского хребта; 13 — ниже-среднеплейстоценовые вулканы базальтового и андезибазальтового составов; 14 — нижнеплейстоценовые лавы и туфы базальтов и андезибазальтов; 15–16 — верхнеплиоцен-средне- и нижнеплейстоценовые отложения: 15 — вулканогенно-осадочные породы паужетской свиты, 16 — лавы и туфы древних вулканов; 17–21 — верхнемiocен-нижнеплиоценовые осадочно-вулканогенные отложения: 17 — конгломераты и песчаники, реже туфы и лавы базальтов, 18 — туфы и лавы базальтов, туфоконгломераты, 19 — туфобрекчии и туфоконгломераты, 20 — грубообломочные туфы и лавы базальтов, 21 — песчаники и конгломераты, реже — туфы; 22 — миоценовые преимущественно вулканогенные нерасчлененные отложения; 23 — верхнемiocен-плиоценовые субвулканические интрузии диоритов и диоритовых порфириров; 24 — рыхлые отложения различного генезиса и возраста; 25–27 — вулканические морфоструктуры: 25 — конусы вулканов (а — простые, б — с вершинным кратером), 26 — шлаковые конусы, мелкие моногенные вулканы и экструзии, 27 — кальдеры и остатки бортов кальдер; 28 — литологические границы; 29 — разрывные тектонические нарушения; 30 — крупные термопроявления: 1 — Первые Горячие Ключи, 2 — Паужетское геотермальное месторождение, 3–5 — группы термальных полей Камбального хребта: 3 — Северо-Камбальная, 4 — Центрально-Камбальная, 5 — Южно-Камбальная; 6–7 — термоаномалии Кошелевского вулканического массива: 6 — Верхне-Кошелевская, 7 — Нижне-Кошелевская; 8 — Сивучинские термальные источники.

конуса перекрывают с угловым несогласием гидротермально измененные лавы и туфы, которые слагают средне-плейстоценовый стратовулкан Термальный (Долгоживущий ..., 1980; Литасов, Важеевская, 1991). На основе детального изучения двух геологических разрезов на этом участке хребта Камбальный В.Л. Сывороткин (1993) выделяет крупный позднеплейстоценовый вулкан Камбальный Северный, постройка которого объединяет несколько полуразрушенных вулканов, а также экструзии и субвулканические тела от андезибазальтового до андезидацитового составов. Несмотря на различия в трактовке возраста, Н.Е. Литасов и А.А. Важеевская, а также и В.Л. Сывороткин выделяют единый крупный плейстоценовый вулкан, остатки которого в виде нескольких построек расположены между вулканом Камбальный и горой Черные Скалы (рис. 2). Породы этого вулкана, одного из наиболее ранних в структуре Камбального хребта, составляют основу хребта и подстилают голоценовый конус вулкана Камбальный (Белоусов, 1978; Нехорощев, 1959).

На вершине вулкана Камбальный располагается кратер размером  $\sim 750 \times 550$  м и глубиной до 150 м, открытый на юго-запад. Ниже к кратеру примыкает воронка взрыва размером  $\sim 200 \times 100$  м и глубиной 10–50 м. Эти структуры образованы в позднеголоценовое время вследствие одного или нескольких направленных взрывов: взрывные отложения образуют крупное тело на ЮЗ склоне постройки (Долгоживущий ..., 1980; Литасов, Важеевская, 1991). Также к завершающим этапам деятельности Камбального вулкана относится образование шлаковых конусов и отдельных потоков базальтов у подножья и на склонах постройки. В.И. Белоусов (1978) выделяет лавовый поток базальтов, берущий начало в вершинном кратере (рис. 2). Нами проведено обследование этого потока на кромке кратера и на склоне вулкана и выполнено опробование пород — от массивных разностей до шлаковидных и высокопористых базальтов с целью проведения петрографических, петрофизических, микронзондовых и др. исследований.

Изучение вершинного кратера при облете вулкана (12.04.2017 г.) и в пешеходном маршруте (01.08.2017 г.), а также с использованием космических снимков позволило выявить новую структуру — провал-воронку поперечным сечением  $\sim 115 \times 100$  м и субвертикальными стенками. Эта структура послужила каналом, по которому газ и пепел транспортировались из глубины постройки во время извержения 2017 г., и каналом для паро-газовой эмиссии после извержения (рис. 4). На стенках основного кратера обнаружены следы фумарольной деятельности недавнего прошлого — площадки гидро-

термально измененных базальтов с отложениями самородной серы. В основании крутой стенки восточного склона вулкана также установлено остывшее фумарольное поле размером  $\sim 50 \times 50$  м, сложенное опалитизированными базальтами. К этому полю примыкает современная термальная площадка размером  $\sim 10 \times 10$  м с грязеводными котлами, прогретыми грунтами и отложениями самородной серы (рис. 3).

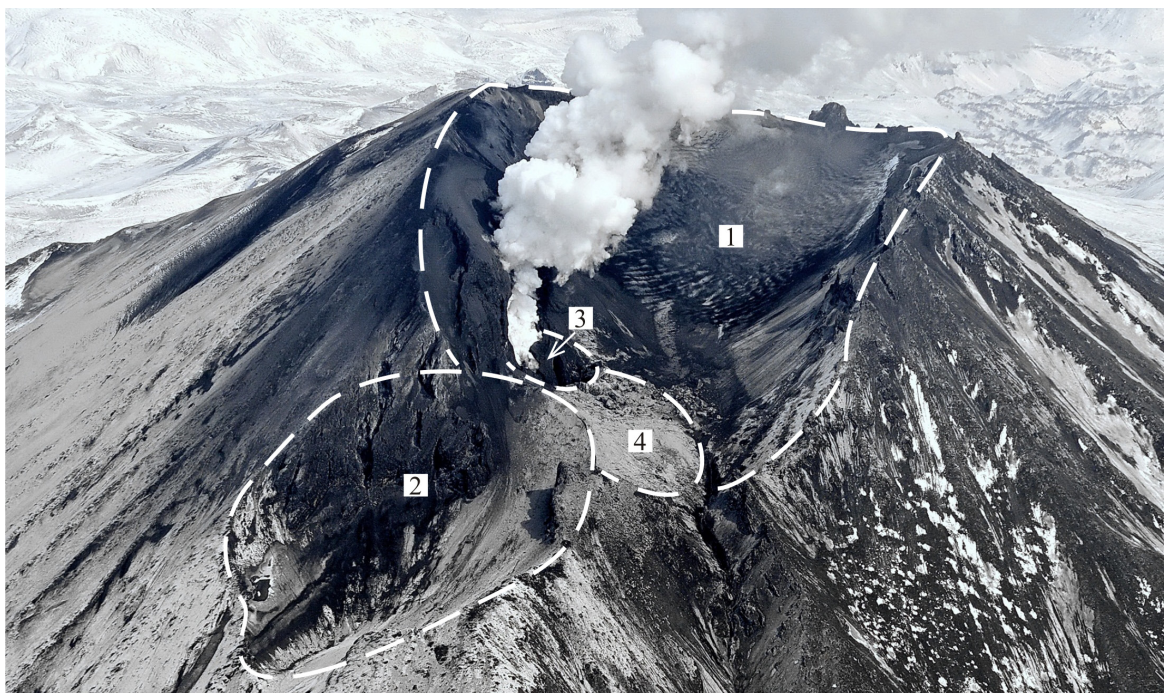
## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью изучения продуктов извержения вулкана Камбальный отобрано 6 проб пепла на различном удалении от кратера в хронологическом порядке — с 28.03.2017 г. по 12.04.2017 г. (рис. 5). Соблюдалась стандартная методика опробования: на максимально ровной площадке размером  $1 \times 1$  м собирался весь слой свежесопавшего пепла в двойные пластиковые пакеты. Далее в лабораторных условиях при комнатной температуре смесь пепла и снега настаивалась в течение от 2–3 до 30 суток (проба № 6). Полученный раствор (называемый нами достаточно условно водной вытяжкой) отфильтровывался и анализировался на определение общего химического состава в Аналитическом Центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН). Твердый осадок подвергался стандартным процедурам: высушивался, взвешивался, квартовался.

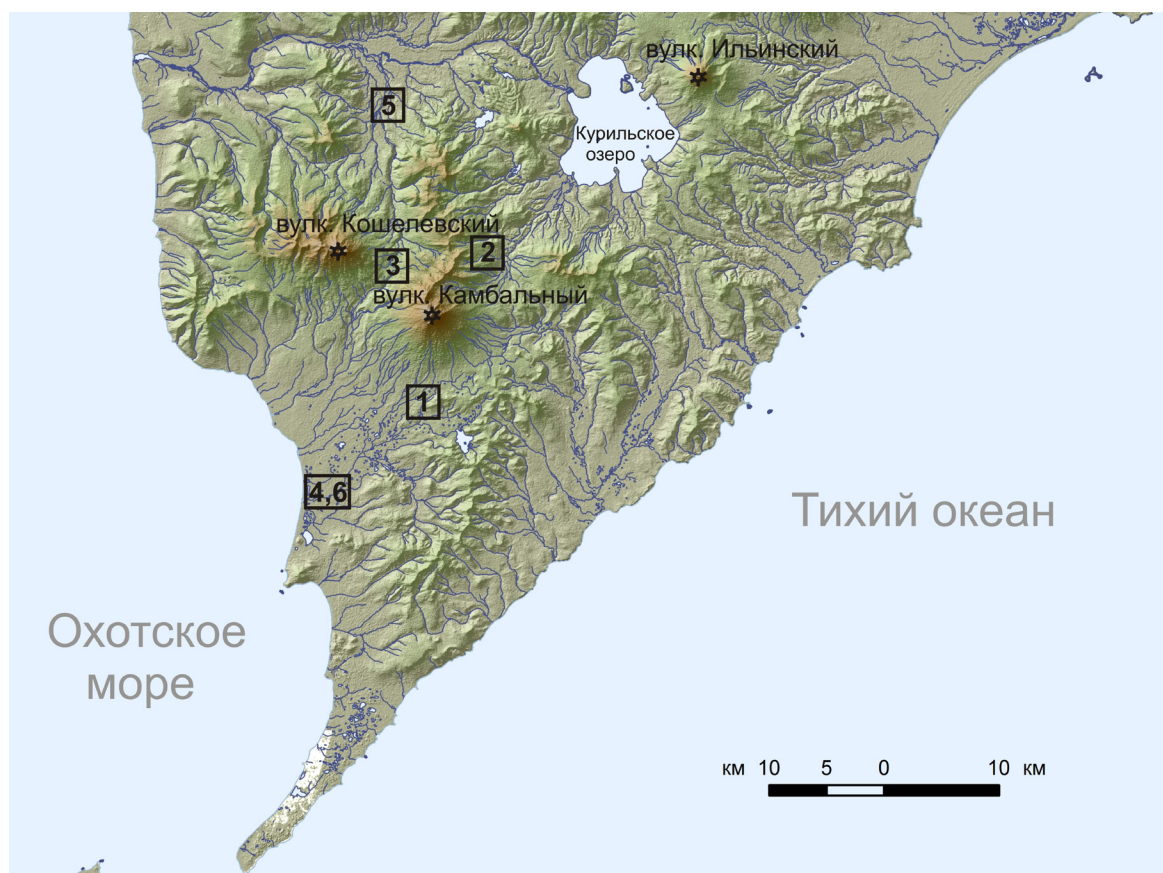
Лабораторные исследования сухого пепла включали общий минералогический анализ (описание частиц пепла с использованием бинокулярных микроскопов МПСУ-1 и МС-ВП), изучение гранулометрического состава стандартным методом с помощью комплекта сит из нержавеющей стали, определение общего химического состава рентгенофлуоресцентным методом, изучение минералогии пепла на основании инфракрасной спектроскопии (ИКС) и рентгенофазового анализа (РФА), микронзондовые исследования.

Для выполнения ИКС и РФА образцы пепла были разделены на легкую и тяжелую фракции с помощью бромформа ( $\rho = 2.9$  г/мл), записи спектров и дифрактограмм осуществлены для обоих типов фракций. Дифрактограммы записаны на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000, в диапазоне  $6-60^\circ 2\theta$ , с шагом  $0.05^\circ 2\theta$ . Скорость сканирования составляла 1 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке 3 с. Уточнение профильных параметров выполнено в программе PowderCell 2.4, с помощью встроенного алгоритма, реализующего метод Ритвельда. ИК-спектры записаны на инфракрасном спектрофотометре с Фурье-преобразованием IR Affinity, в диапазоне волновых чисел  $400-4000$   $\text{см}^{-1}$ ,





**Рис. 4.** Конус вулкана Камбальный после извержения 2017 г. Вид с юго-запада: 1 — вершинный кратер, 2 — воронка взрыва (структуры, существовавшие до извержения 2017 г.), 3 — воронка-провал, образованная во время извержения 2017 г.; 4 — отложения пепла и другого обломочного материала (участок выделялся температурной аномалией по данным тепловой съемки 12.04.2017 г. — устное сообщение С.А. Чиркова и И.К. Дубровской). Фото А.В. Сокоренко.



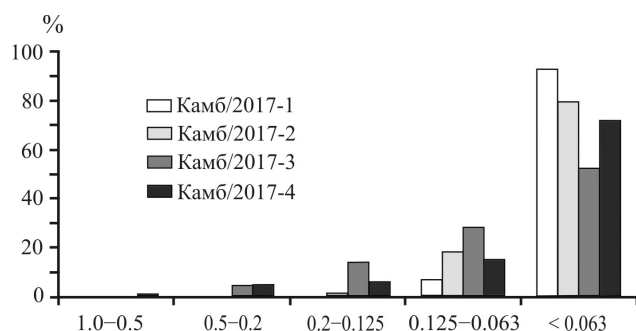
**Рис. 5.** Расположение участков и даты отбора проб пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г. Номера участков соответствуют номерам проб: 1 — Камб/2017-1, 2 — Камб/2017-2, и т.д. Даты отбора проб: 1 — 28.03.17 г., 2,3 — 01.04.17 г., 4 — 31.03.17 г., 5 — 09.04.17 г., 6 — 12.04.17 г.

с разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$  и числом сканов 100. Для записи спектров образцы были растерты в ага-товой ступке с бромидом калия и спрессованы в таблетки.

Морфология и химический состав минералов и минеральных образований (около 2000 зерен) изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3, оснащенного энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС) X-MAX 80 с фирменным программным обеспечением AZtec (ИВиС ДВО РАН, оператор В.М. Чубаров). Химические элементы определены путем сравнения с эталонами, состав которых был проверен на однородность и содержание элементов. Поверхность зерен подвергалась углеродному напылению. Поскольку объекты исследования не обладают плоской поверхностью, результаты анализов нормализованы на 100% для удобства работы с аналитическим материалом, при этом сделана выборка максимально достоверных анализов. Характеристика минерального состава пепла дана на основе изучения пробы Камб/2017-1 (рис. 5) (фракция 0.125–0.063), которая предварительно промывалась водой и просматривалась под биноклем. Видимых различий в минеральном составе изученной пробы с другими пробами не выявлено.

### СОСТАВ ПЕПЛА

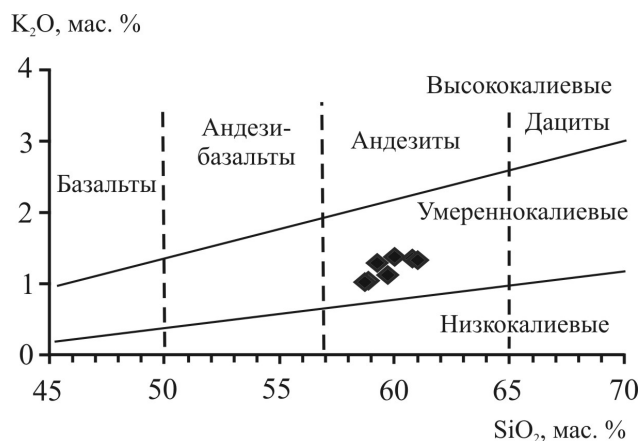
Гранулометрический анализ показал, что в составе пепла преобладает фракция  $< 0.063 \text{ мм}$  (50–93%), фракция 0.125–0.063 мм составляет от 7 до 27% (рис. 6). Гранулометрический состав пепла остается постоянным как на расстоянии 5–6 км, так и 18–19 км от кратера вулкана, что подтверждается также общим минералогическим анализом всех проб. Согласно классификации Е.Ф. Малеева (1980), пепел состоит из алевритовых и пелитовых частиц. Обломки пепла имеют близкую к изометричной, «комковатую» форму, края сглажены. Общий минеральный состав алевритовой и пелитовой фракций практически идентичен: 65–70% представлено полевыми шпатами, 15–18% — стеклом базиса



**Рис. 6.** Гранулометрический состав пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г.

пород, 5–8% — прозрачным кварцем, до 5% — темноцветными минералами (пироксенами, пиритом, оксидами железа), 5–8% — обломками гидротермально измененных пород (вторичных кварцитов, опалитов).

Согласно петрохимическому составу, пепел относится к низкощелочным умереннокалиевым андезитами (рис. 7, табл. 1). Распределение каждого химического компонента характеризуется незначительным разбросом значений. Обращают на себя внимание устойчивые повышенные содержания серы — от 0.5 до 1.45%. Такое содержание серы типично для гидротермально измененных пород района (табл. 2). Не случайно в пробах обнаружены вторичные кварциты, опалиты, глинистые минералы (являющиеся активными сорбентами многих компонентов, в том числе соединений серы), гипс, пирит и самородная сера. Водные вытяжки из пеплов характеризуются относительно высокой минерализацией (табл. 3). Особенно выделяется проба № 6, в которой частицы пепла взаимодействовали с водным раствором в течение 30 суток. Из анионов преобладает сульфат, концентрации хлора достигают  $30 \text{ мг/дм}^3$ . Катионный состав смешанный существенно кальциевый, присутствуют Na, K, Fe, аммоний и др. Соотношения между компонентами и уровень их относительных концентраций во всех пробах практически одинаковые. Такой состав водных вытяжек сформировался, вероятнее всего, за счет взаимодействия водной фазы с сульфатами (обычно легко растворимыми) и тонкими частицами плагиоклазов, а также с компонентами вулканического газа (прежде всего, сернистыми газами), присутствующими в тонких порах пепла. Об этом свидетельствует и проведенный нами лабораторный эксперимент — длительная выдержка пепла в водном растворе на примере пробы № 6 (табл. 3). Наличие  $\text{NH}_4$  в пробах нельзя назвать



**Рис. 7.** Распределение составов пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г. на диаграмме  $\text{K}_2\text{O}$ – $\text{SiO}_2$ .



Таблица 1. Химический состав пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г., вес. %.

№ п. п.	Номер пробы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ппп	Sum	S
1	Камб/2017-2	61.1	0.652	17.0	3.37	2.4	0.0928	5.32	1.92	3.27	1.31	0.136	2.65	99.22	0.689
2	Камб/2017-3	59.3	0.623	16.4	3.58	2.05	0.0962	6.66	2.19	3.07	1.27	0.148	2.98	98.37	1.45
3	Камб/2017-4	60.1	0.585	16.1	2.84	2.43	0.102	6.33	2.22	3.4	1.37	0.139	3.34	98.96	0.928
4	Камб/2017-5	60.8	0.616	17.9	2.93	1.86	0.069	3.93	1.89	2.95	1.35	0.166	5.57	100.03	0.516
5	Камб/2017-6-1	59.8	0.695	18.1	3.46	2.15	0.094	5.19	2.67	3.18	1.12	0.179	4.01	100.65	0.79
6	Камб/2017-6-2	58.8	0.72	18.2	3.04	2.66	0.097	5.24	2.49	2.96	1.01	0.164	4.00	99.38	0.723
7	Камб/2017-6-3	58.9	0.754	18.3	2.95	2.98	0.099	5.33	2.56	3.03	1.02	0.168	3.99	100.08	0.737

Примечание. Проба Камб/2017-6 была разделена на 4 равные части, 3 части проанализированы отдельно с методической целью: определения степени однородности распределения материала в пробе и повышения достоверности результата. Данные получены в Аналитическом центре ИГиС ДВО РАН на рентгенофлуоресцентном спектрометре «S4 PIONEER». Заведующая АЦ Е.В. Карташова. Аналитики: Н.Ю. Курносова, Н.И. Чеброва, В.М. Рагулина.

случайным: высокие концентрации аммония характерны для водных источников и гидротермально измененных пород, а содержащие аммоний минералы образуются на термальных полях района (Калачева и др., 2016; Сережников и др., 1982; Структура ..., 1993).

По данным ЭДС из полевых шпатов преобладают плагиоклазы среднего состава, в подчиненном количестве присутствуют плагиоклазы основного состава, еще реже встречаются кислые (рис. 8, табл. 4). Стекло из базиса пород имеет алюмосиликатный полевошпатовый состав, оно содержит в себе микролиты плагиоклазов и пироксенов, а также включения титаномagnetита. Содержание SiO<sub>2</sub> в стекле колеблется в пределах 70.7–82.5 мас.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 11–12.9 (табл. 4). В меньших количествах в стекле присутствуют: Na<sub>2</sub>O (3.6–4.4), K<sub>2</sub>O (1.1–4), CaO (1.2–2.3), FeO (до 5.8), реже TiO<sub>2</sub> (до 1.2) и MgO (до 1 мас.%). На диаграмме Ab–Ort–An (рис. 9a) составы стекла распределяются в зоне анортозита и санидина. Кварц почти не содержит примесей, отмечается только Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 1.5 мас.%).

Пироксены представлены кальций-магний-железистыми разновидностями (табл. 5). Часть из них по составу относится к гиперстену (рис. 9б). Содержание основных компонентов в нем колеблется в следующих пределах (мас.%): SiO<sub>2</sub> 52.9–56.5, FeO 14.5–22.1, MgO 20.9–23.8. Из примесей в гиперстене присутствуют (мас.%): Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.2–3.6), CaO (0.4–1.1), MnO (1–2.7), иногда TiO<sub>2</sub> (до 1.5). Некоторые составы пироксенов соответствуют пижониту. По сравнению с гиперстеном, в пижоните возрастает содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 5.4), CaO (до 4) и снижается содержание MnO (до 0.9 мас.%). Другая часть пироксенов относится к авгиту. Содержание основных компонентов в авгите следующее (мас.%): SiO<sub>2</sub> — 51.7–55.3, FeO — 8.1–13.4, MgO — 12.9–19.3, CaO — 10.8–18.1. В небольшом количестве в нем присутствуют (мас.%): Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2.2–7.2), TiO<sub>2</sub> (0.4–0.9), MnO (до 0.6), Na<sub>2</sub>O (до 1.5) и K<sub>2</sub>O (до 0.5).

Магнетит находится в виде включений во всех породообразующих минералах и стекловатых обломках. Самостоятельные зерна магнетита наблюдаются во фракции < 0.063 мм. Содержание TiO<sub>2</sub> в проанализированных включениях магнетита колеблется от 1 до 12 мас.%. Выделено одно зерно сферической формы, полностью сложенное скелетными кристаллами магнетита (рис. 10a), который в своем составе не имеет примесей. Такие сферические образования рудных минералов, в целом, характерны для вулканических пород, но могут иметь как вулканическое (в частности, первично магматическое), так и гидротермально-метасоматическое происхождение (Карпов и др., 1984; Новгородова, 1983; Рычагов и др., 1996; Сандиминова, 2008).

**Таблица 2.** Содержание серы в породах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального (рудного) района.

№ п.п.	Порода	Содержание S, мас. %
1	Лавы (андезиты, андезибазальты) вулкана Третья Речка	0.006–0.02
2	Вулканогенно-осадочные породы основания Кошелевского вулкана	0.1–0.2
3	Почвенно-пирокластические отложения в районе Нижне-Кошелевского Нового термального поля (вулкан Западный)	0.1–0.3
4	Пропилиты Паужетской гидротермальной системы	0.02–0.6
5	Аргиллизиты и вторичные кварциты палеогидротермальной системы Третья Речка	0.5–3.0
6	Гидротермальные глины Нижне- и Верхне-Кошелевской термоаномалий	0.02–6.5
7	Гидротермальные глины Южно-Камбального Центрального термального поля	1.5–17.0
8	Донные отложения в районе термоаномалий	1.5–6.0

Примечание. Обобщены авторские данные за тридцатилетний период исследований пород района. Основными минералами, содержащими серу, являются: для слабо измененных пород, пропилитов и донных отложений — сульфиды (преобладает пирит); для аргиллизированных пород и гидротермальных глин — сульфаты Ca, Mg, Fe и др. металлов, а также самородная сера.

**Таблица 3.** Общий химический состав водных вытяжек из пепла вулкана Камбальный, мг/дм<sup>3</sup>.

Компоненты	Камб/2017-1	Камб/2017-2	Камб/2017-5	Камб/2017-6
pH лабораторный	5.15	5.76	3.45	4.18
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.20	0.60	—	—
F	—	—	—	—
Cl <sup>-</sup>	16.00	1.40	30.18	8.52
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	451.50	19.20	157.40	825.60
<b>Сумма анионов</b>	<b>468.70</b>	<b>21.20</b>	<b>187.58</b>	<b>834.12</b>
H <sup>+</sup>	—	—	0.39	—
Na <sup>+</sup>	11.70	4.60	10.89	26.51
K <sup>+</sup>	5.00	0.60	1.67	5.97
Ca <sup>2+</sup>	176.4	2.80	51.12	251.20
Mg <sup>2+</sup>	2.80	0.50	3.11	11.14
Fe <sup>2+</sup>	0.20	0.20	0.21	0.53
Fe <sup>3+</sup>	0.50	0.70	0.10	31.41
Al <sup>3+</sup>	0.30	0.50	—	—
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.70	0.30	0.59	10.37
<b>Сумма катионов</b>	<b>198.60</b>	<b>10.20</b>	<b>67.69</b>	<b>337.13</b>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> растворимая	5.60	2.50	17.6	67.5
<b>Минерализация</b>	<b>672.90</b>	<b>33.90</b>	<b>272.87</b>	<b>1238.79</b>

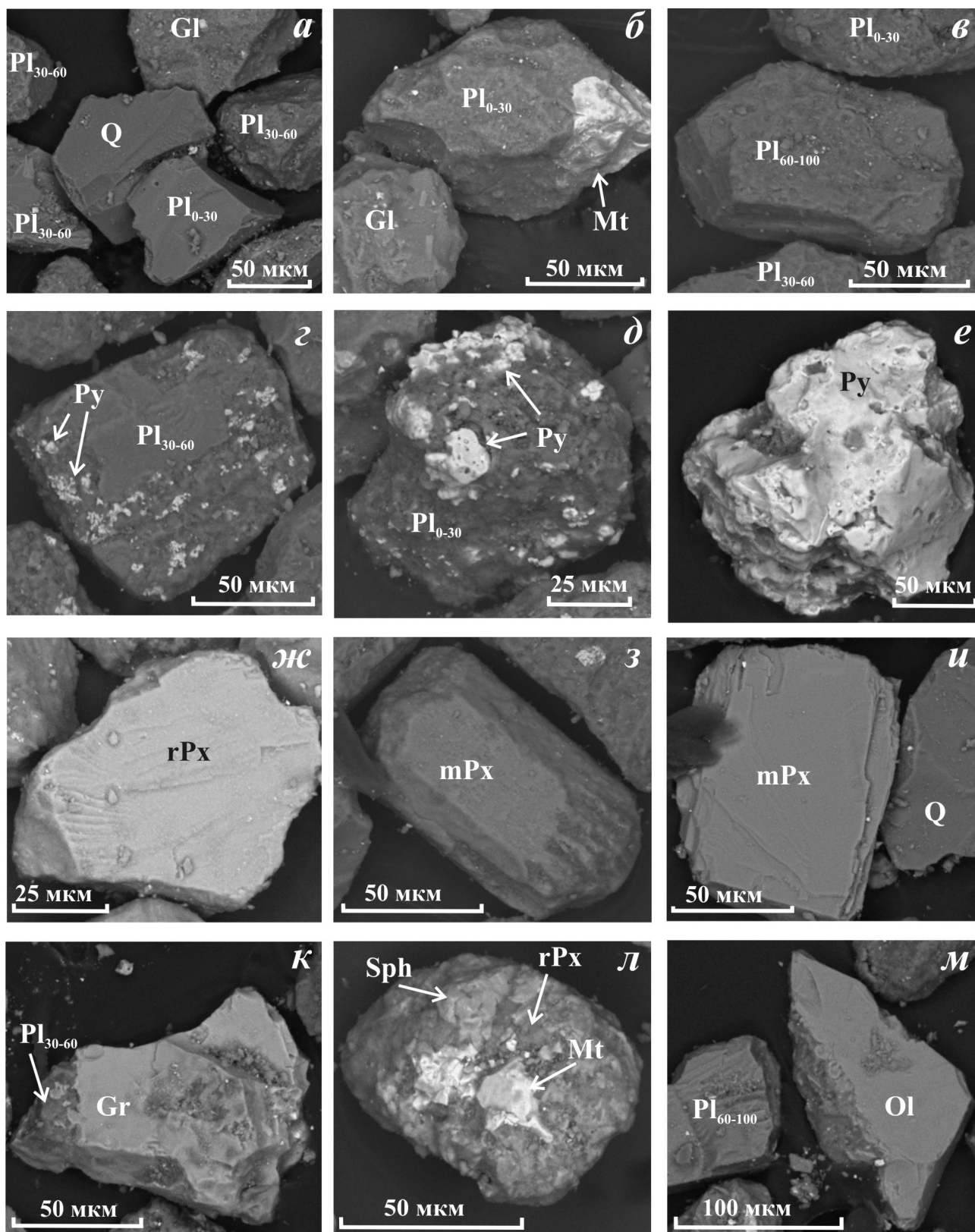
Примечание. Определения выполнены в Аналитическом Центре ИВиС ДВО РАН, аналитики С.В. Сергеева и А.А. Кузьмина. «—» — содержание компонента ниже предела обнаружения.

В пепле присутствуют единичные зерна оливина (Fa<sub>25</sub>), андрагита (SiO<sub>2</sub> — 38.47, CaO — 31.61, FeO — 28.38 мас. %) и сфена (CaO — 24.82, TiO<sub>2</sub> — 32.54, SiO<sub>2</sub> — 38.87, FeO — 1.33) (рис. 8, *к–м*). Кроме того, обнаружено зерно с самородными медью и железом (рис. 10*б*). Из вторичных минералов в пеплах распространен пирит, встречается каолинит.

По данным ИК-спектроскопии легкая фракция пеплов представлена кварцем и полевыми

шпатами, в отдельных образцах обнаружены каолинит и гипс (рис. 11*а*). На дифрактограммах отмечаются те же минералы. Кроме того, более детально охарактеризованы состав и структура полевых шпатов (рис. 11*в*): они представлены битовнитом, низким (Ab<sub>1</sub>) и высоким (Ab<sub>2</sub>) альбитом, максимальным микроклином. Известно, что с повышением температуры увеличивается степень Si/Al-разупорядочения — наиболее упорядоченные модификации полевых шпатов, как





**Рис. 8.** Минеральный состав пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г. (а–м). Pl<sub>0-30</sub> — плагиоклазы кислого состава, Pl<sub>30-60</sub> — плагиоклазы среднего состава, Pl<sub>60-100</sub> — плагиоклазы основного состава, Q — кварц, Gl — стекло, rPx — ромбический пироксен, mPx — моноклинный пироксен, Ol — оливин, Mt — титаномagnetит, Gr — андрадит, Sph — сфен, Py — пирит. Снимки BSE.

Таблица 4. Химический состав плагиоклазов и стекла из пепла вулкана Камбальный (проба Камб/2017-1).

Анализ	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Миналы		
										Ab	An	Ort
1	45.30		35.13	0.61		18.14	0.83		100.00	7.64	92.36	
2	46.37		33.97	0.78		17.73	1.15		100.00	10.52	89.48	
3	49.43		31.82	0.87		15.15	2.73		100.00	24.61	75.39	
4	50.22		32.32	0.74		14.12	2.61		100.00	25.09	74.91	
5	50.69		31.82	1.55	0.95	12.09	2.65	0.25	100.00	27.90	70.35	1.75
6	53.12		29.84	0.80	0.35	11.47	4.42		100.00	41.11	58.89	
7	56.20		27.64			10.79	4.93	0.44	100.00	44.08	53.31	2.61
8	56.62		27.43	1.16	0.49	9.16	4.85	0.28	100.00	48.02	50.15	1.84
9	58.03		26.23	0.87	0.39	7.29	6.95	0.24	100.00	62.39	36.18	1.43
10	59.85		23.53	1.49	0.74	8.22	4.98	1.19	100.00	48.30	44.10	7.60
11	59.56		25.06	0.96	0.86	6.80	6.20	0.57	100.00	60.03	36.36	3.60
12	60.00		24.84	0.56	0.41	7.15	6.30	0.74	100.00	58.69	36.80	4.51
13	60.35	0.38	25.34	1.39	1.71	6.40	3.72	0.72	100.00	48.10	45.79	6.11
14	60.17		23.37	1.66	1.53	7.42	5.20	0.65	100.00	53.43	42.15	4.42
15	62.23		23.18	1.11	0.50	6.89	5.34	0.75	100.00	55.39	39.50	5.12
16	62.47		22.81	1.90	0.47	4.72	6.77	0.87	100.00	68.04	26.21	5.75
17	69.49	0.39	17.56	1.60	0.71	3.42	4.93	1.91	100.00	61.02	23.40	15.58
18	69.60	0.51	16.07	2.13	1.55	3.53	5.00	1.62	100.00	62.41	24.32	13.27
19	69.76	0.56	15.44	3.07	1.34	2.19	4.21	3.45	100.00	54.76	15.71	29.53
20	70.29	0.44	16.41	2.68	2.07	2.24	2.99	2.89	100.00	48.80	20.18	31.02
21	70.74	1.17	12.88	5.84	1.01	1.51	4.42	2.42	100.00	64.53	12.21	23.26
22	72.77	0.64	13.10	4.05	0.41	1.51	3.56	3.96	100.00	50.90	11.91	37.20
23	73.65	0.43	14.15	2.45	0.64	2.18	3.98	2.52	100.00	58.14	17.65	24.21
24	78.95		12.23	1.03	0.47	2.25	3.96	1.11	100.00	66.72	20.93	12.35
25	82.47		10.96		0.32	1.17	3.94	1.14	100.00	73.85	12.11	14.04

Примечание. Анализы: 1–5 — плагиоклазы основного состава, 6–15 — плагиоклазы среднего состава, 16–20 — плагиоклазы кислого состава, 21–25 — стекло из базиса пород. Анализы нормированы на 100 %. Миналы минералов рассчитаны в программе PetroExplorer. Ab — альбит, An — анортит, Ort — ортоклаз.

правило, низкотемпературные (Брэгг, Кларингбулл, 1967). В пепле извержения вулкана Камбальный Ab<sub>1</sub> и ортоклаз, близкий к максимальному (низкому) микроклину, относятся к упорядоченным формам. Ab<sub>2</sub> разупорядочен и, следовательно, стабилен при высоких температурах.

По данным рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии тяжелая фракция представлена, в основном, ромбическим гиперстеном (возможно, железистым энстатитом) и моноклинным авгитом, встречаются отдельные кристаллы амфиболов (рис. 11б, 11г). Возможно, присутствует небольшая примесь ортопироксена донпикорита и амфибола парво-мангано-эденита (табл. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что пепел вулкана Камбальный извержения 2017 г. состоит, в основном, из пылеватых частиц размером менее 0.063 мм. Химический состав пепла отвечает низкощелочному умереннокалиевому андезиту. В минеральном составе преобладает соответствующая таким андезитах ассоциация: плагиоклазы среднего состава, кислое стекло с микролитами пироксенов и плагиоклазов, кварц, Ca-Mg-Fe ромбические и моноклинные пироксены, титаномагнетит, сфен. В подчиненном количестве присутствуют минералы, характерные для базальтов: плагиоклазы основного

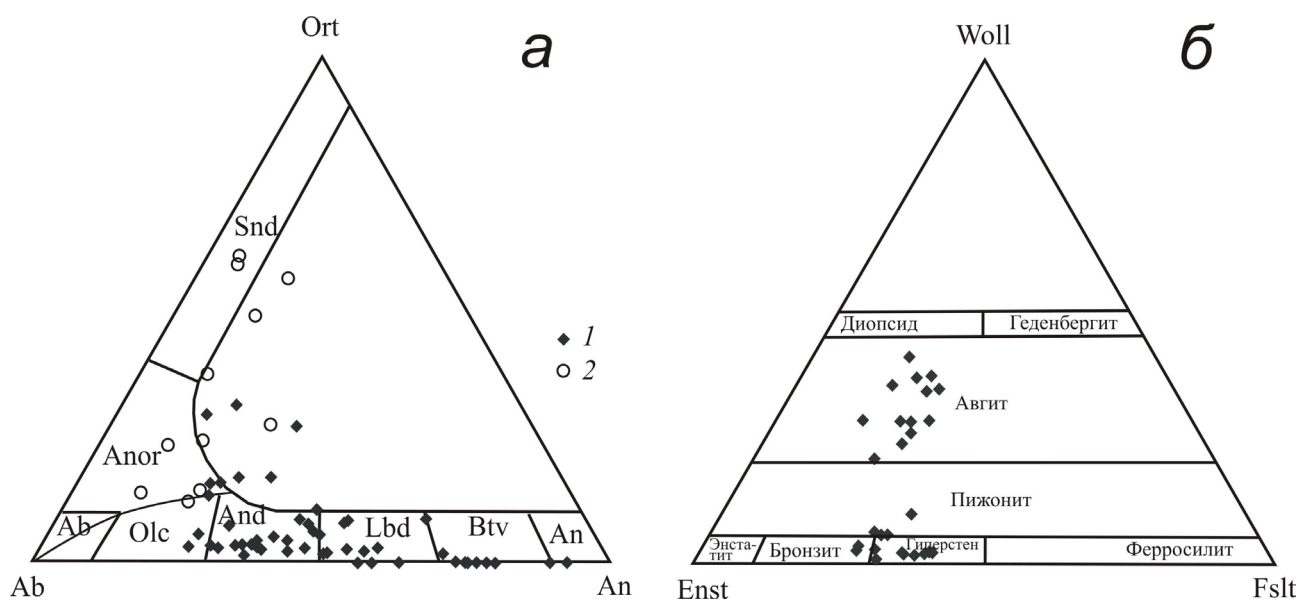


## СОСТАВ ПЕПЛА ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ

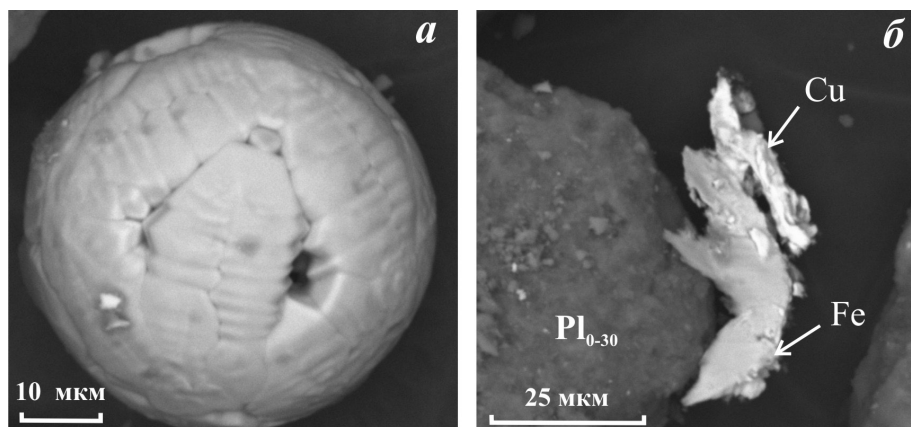
Таблица 5. Химический состав пироксенов из пепла вулкана Камбальный (проба Камб/2017-1).

Анализ	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Миналы		
											Enst	Fslt	Woll
Гиперстен													
1	54.08		1.69	19.57	1.48	21.67	0.97	0.53		100.00	63.39	34.58	2.03
2	54.13		1.40	20.03	1.66	21.96	0.81			100.00	63.24	35.07	1.69
3	52.98		1.22	22.10	2.01	20.86	0.83			100.00	59.60	38.69	1.71
4	56.49		3.55	14.49	0.99	23.41	1.08			100.00	71.22	26.43	2.36
5	52.94	1.47	2.35	16.37	2.65	23.82	0.40			100.00	68.45	30.72	0.83
6	54.20		1.36	20.93	1.67	21.09	0.75			100.00	61.44	36.99	1.56
Пижонит													
7	53.96	1.02	5.43	16.38	0.63	20.22	2.36			100.00	64.26	30.34	5.40
8	54.82	0.42	5.22	16.22	0.90	17.23	4.04	0.86	0.29	100.00	57.93	32.31	9.76
9	55.39	0.38	5.22	15.72	0.53	20.19	2.33		0.23	100.00	65.15	29.44	5.41
10	55.59		3.31	15.59	0.71	21.66	2.81		0.33	100.00	65.98	27.87	6.15
Авгит													
11	53.82	0.44	3.92	8.43	0.53	19.32	13.30		0.25	100.00	56.98	14.83	28.19
12	51.69	0.75	5.09	13.43	0.62	12.88	15.09	0.45		100.00	40.74	24.95	34.32
13	51.75	0.89	5.54	9.46	0.00	13.56	18.05	0.75		100.00	42.59	16.66	40.75
14	55.27	0.45	6.40	11.08	0.50	13.61	10.75	1.48	0.48	100.00	48.89	23.34	27.77
15	52.36	0.58	2.94	13.18	0.52	14.42	15.73		0.27	100.00	43.17	23.00	33.83
16	53.38	0.57	2.21	12.41	0.61	17.22	13.18	0.43		100.00	50.66	21.49	27.85
17	54.83	0.67	7.22	8.10	0.35	14.00	14.05	0.78		100.00	48.54	16.45	35.01

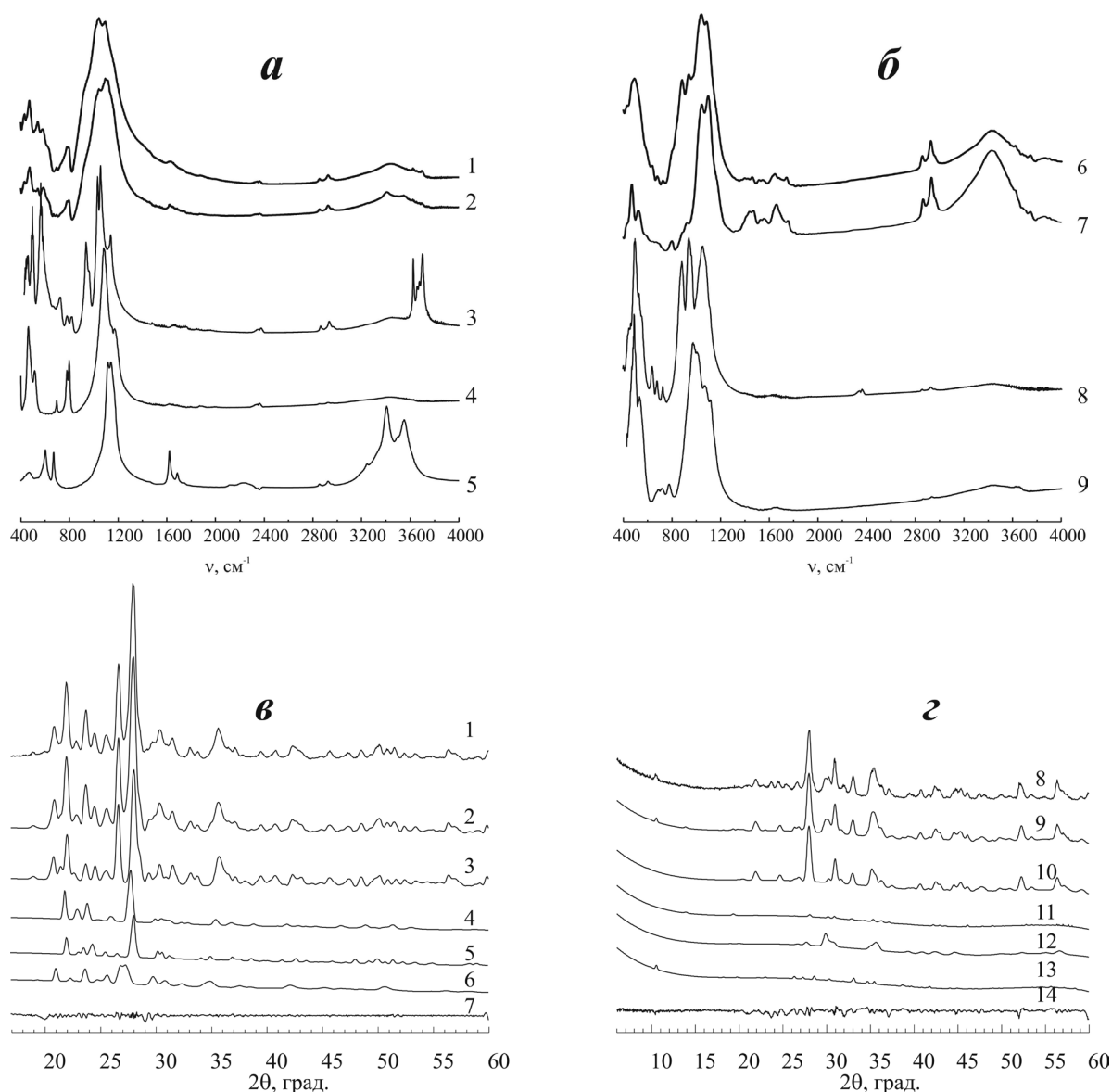
Примечание. Анализы нормированы на 100 %. Миналы минералов рассчитаны в программе PetroExplorer. Enst — энстатит, Fslt — ферросилит, Woll — волластонит.



**Рис. 9.** Распределение составов полевых шпатов и стекла из пепла извержения вулкана Камбальный в 2017 г. на диаграмме Ab–Ort–An (Deer et al., 1992) (а): Ab — альбит, An — анортит, Ort — ортоклаз, And — андезин, Anor — анортоклаз, Btv — битовнит, Olc — олигоклаз, Lbd — лабрадор, Snd — санидин; 1 — полевые шпаты, 2 — стекло из базиса пород. Распределение составов пироксенов из пепла извержения вулкана Камбального в 2017 г. на диаграмме Enst–Woll–Fslt (Morimoto et al., 1988) (б): Enst — энстатит, Woll — волластонит, Fslt — ферросилит.



**Рис. 10.** Магнетитовая сферула (*а*), самородное железо (Fe) и самородная медь (Cu) на плагиоклазе кислого (Pl<sub>0-30</sub>) состава (*б*). Снимки BSE.



**Рис. 11.** Инфракрасные спектры легкой (*а*) и тяжелой (*б*) фракций пепла: отдельных образцов, содержащих каолинит (1) и гипс (2); чистого каолинита (3), кварца (4), гипса (5); энстатита (6) и амфибола (7); энстатита (8) и амфибола (9) Восточно-Паужетского термального поля (приведены для сравнения). Дифрактограммы легкой (*в*) и тяжелой (*г*) фракций пепла: экспериментальные кривые легкой (1) и тяжелой (8) фракций; теоретически рассчитанные суммарные дифрактограммы с уточненными профильными параметрами (2, 9); уточненные дифрактограммы битовнита (3), высокого альбита (4), низкого альбита (5), максимально-го микроклина (6), энстатита (10), донпикорита (11), авгита (12), парво-мангано-эденита (13); дифференциальные кривые (7, 14).



## СОСТАВ ПЕПЛА ВУЛКАНА КАМБАЛЬНЫЙ

**Таблица 6.** Минеральный состав пепла вулкана Камбальный по данным рентгеновской дифрактометрии (пробы Камб/2017-2,3,4)

Название минерала	Формула	Пр. гр., параметры ячейки (Å)
Гиперстен (или железистый энстатит $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ )	$\text{FeMgSi}_2\text{O}_6$	<i>Pbca</i> <i>a</i> 18.31 <i>b</i> 8.91 <i>c</i> 5.8
Донпикорит (?)	$(\text{Mg, Mn})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	<i>Pbca</i> <i>a</i> 18.8 <i>b</i> 8.2 <i>c</i> 5.7
Авгит	$(\text{Ca, Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	<i>C2/c</i> <i>a</i> 9.4 <i>b</i> 8.9 <i>c</i> 5.6 $\beta$ 106.1
Парво-мангано-эденит (?)	$\text{Na}(\text{CaMn})_2\text{Mg}_5(\text{Si,Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	<i>C2/m</i> <i>a</i> 9.2 <i>b</i> 17.8 <i>c</i> 5.9 $\beta$ 104.1
Битовнит ( $\approx \text{An}_{0,85}$ )	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ $(\text{Ca}_{0,86}\text{Na}_{0,14})\text{Al}_{1,84}\text{Si}_{2,16}\text{O}_8$ состав определен по параметрам ячейки	<i>P-1</i> <i>a</i> 8.7 <i>b</i> 12.6 <i>c</i> 14.8 $\alpha$ 94.8 $\beta$ 115.9 $\gamma$ 90.4
Альбит высокий (анортоклаз)	$(\text{Na}_{0,7}\text{K}_{0,3})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ состав определен по параметрам ячейки	<i>C-1</i> <i>a</i> 8.6 <i>b</i> 12.5 <i>c</i> 7.1 $\alpha$ 91.3 $\beta$ 115.9 $\gamma$ 89.4
Альбит низкий	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	<i>C-1</i> <i>a</i> 8.7 <i>b</i> 12.5 <i>c</i> 7.3 $\alpha$ 94.1 $\beta$ 116.4 $\gamma$ 87.2
Ортоклаз (микроклин мак- симальный ?)	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	<i>C2/m</i> <i>a</i> 8.1 <i>b</i> 12.1 <i>c</i> 7.2 $\beta$ 115.9
Каолинит	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	—
Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—

Примечание. Пр. гр. — пространственная (кристаллографическая) группа.

состава, оливин, пижонит. Характерно наличие в составе пепла альбита, пирита, гипса, каолинита, частиц измененных пород (вторичных кварцитов, опалитов) и самородной серы. Установлены андрадит, самородные металлы (Fe, Cu).

Полученные данные свидетельствуют о том, что пепел является резургентным, а его источником служат плиоцен-плейстоценовые породы, слагающие вулканический хребет Камбальный. Как известно, вдоль всего хребта располагаются

крупные и, вероятно, долгоживущие гидротермальные системы, породы которых подверглись воздействию гидротермального метаморфизма (Белюсов, 1978; Нехорошев, 1959; Структура ..., 1993). Об этом свидетельствуют и наши данные изучения пепла — достаточно высокое содержание в пепле пирита, гипса, каолинита, самородной серы, опала и др. минералов. Наличие в тяжелой фракции гиперстена и авгита можно объяснить их совместной кристаллизацией из

исходного магматического расплава по равновесию  $L \sim \text{Clino-}(\text{hypersthene composition}) \sim \text{Aug}$ . Затем в процессе метаморфизма пород клинопироксен гиперстенового состава переходит в ромбический гиперстен, аналогично моноклинному протоэнстатиту, переходящему в ромбический энстатит. В пользу заключения о том, что источником пепла являются гидротермально измененные породы, служит факт наличия в составе пепла низкого (упорядоченного) и высокого (разупорядоченного) альбита, а также низкого (максимального) микроклина.

В плане решения вопроса о причинах извержения вулкана Камбальный большой интерес представляют исследования В.И. Левиной с коллегами (1980), посвященные сейсмичности района Паужетской гидротермальной системы и Камбального хребта. Авторы этой работы на основании анализа факторов усиления сейсмичности в Паужетском районе с 1973 по 1980 гг. и обобщения сейсмических данных по областям современного вулканизма пришли к выводу о возможной связи гидротермальных процессов с генерацией землетрясений.

Полученные нами результаты изучения состава пепла, данные В.И. Левиной с коллегами (1980) и расположение очагов землетрясений 22.03.2017 г. – 26.03.2017 г. в интенсивно измененных плиоцен-плейстоценовых породах, а также высокая современная гидротермальная активность вулканического хребта Камбальный — все это позволяет обратить внимание на вероятную роль газо-гидротермальных процессов в подготовке и извержении вулкана Камбальный в марте – апреле 2017 г.

Авторы глубоко признательны сотрудникам Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника А.Г. Бондарю, А.С. Габову, В.В. Митринюку, а также О.Н. Чужакаеву и Т.В. Шевченко за отбор проб пепла и их оперативную доставку в ИВиС ДВО РАН. Мы благодарны коллегам по экспедиции А.А. Нуждаеву, Т.В. Шевченко, Ю.В. Фроловой, Р.А. Кузнецову, И.Е. Большакову и др. за помощь в полевых работах; А.С. Габову и А.В. Сокоренко — за предоставление фотоснимков извержения вулкана Камбальный, Д.В. Мельникову — за предоставление космических снимков района исследований и вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-05-00007) и ДВО РАН (проекты 15-I-2-065, 17-I-1-030э).

#### Список литературы

Белоусов В.И. Геология геотермальных полей. М.: Наука, 1978. 176 с.

- Брэгг У.Л., Кларингбулл Г.Ф. Кристаллическая структура минералов. М.: Мир, 1967. 389 с.
- Влодавец В.И., Пийп Б.И., Горшков Г.С. Каталог действующих вулканов СССР // Бюл. вулканол. станции. 1957. № 25. 180 с.
- Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А. Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 263–267.
- Гущенко И.И. Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука, 1979. 476 с.
- Дитмар К. Поездка и пребывание на Камчатке в 1851–1855 гг. СПб., 1901. Ч. I. 756 с.
- Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
- Заварицкий А.Н. Вулканы Камчатки // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1955. Вып. 10. 82 с.
- Калачева Е.Г., Рычагов С.Н., Королева Г.П., Нуждаев А.А. Геохимия парогидротерм Кошелевского вулканического массива (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 41–56.
- Карпов Г.А., Киреев Ф.А., Ероцев-Шак В.А. Самородное железо в гидротермальной системе Камчатки // ДАН. 1984. Т. 274. № 6. С. 1440–1443.
- Кель Н.Г. Карта вулканов Камчатки. Камчатская экспедиция Ф.П. Рябушинского, 1908–1910 гг. Геол. отдел. Л.: Изд. Тихоокеан. Ком. АН СССР и Гос. Русск. Геогр. об-ва, 1928. 76 с.
- Крашенинников С.П. Описание Земли Камчатки. СПб.: Наука, 1994. Т. 1. 440 с.
- Левина В.И., Фирстов П.П., Зобин В.М. Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1980. № 2. С. 81–97.
- Литасов Н.Е., Вазжеевская А.А. Вулкан Камбальный: научное издание // Действующие вулканы Камчатки, в 2-х томах. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 396–405.
- Малеев Е.Ф. Вулканы. М.: Недра, 1980. 240 с.
- Нехорошев А.С. Гидротермальная деятельность района хребта Камбального на южной Камчатке // Бюллетень Вулканологической станции. М.: АН СССР, 1959. № 28. С. 23–32.
- Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 248 с.
- Новограбленов П.Т. Каталог вулканов Камчатки // Изв. Гос. геогр. об-ва. Л.-М.: Главнаука, 1932. Т. 64. Вып. 1. С. 88–89.
- Рудич К.Н. Вулкан Камбальный // Каменные факелы Камчатки. Новосибирск: Наука, 1978. 2-ое изд., переработанное и дополненное. С. 111–112.
- Рычагов С.Н. Исследования Южнокамчатско-Курильской экспедиции ИВиС ДВО РАН



- в Паужетско-Камбально-Кошелевском геотермальном районе на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 203–206.
- Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандимирова Е.И.* Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 31–40.
- Сандимирова Е.И.* Сферические минеральные образования вулканических пород Курильских островов и Камчатки. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2008. 24 с.
- Святловский А.Е.* Атлас вулканов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 175 с.
- Серезников А.И., Селецкий Ю.Б., Поляков В.А. и др.* Дейтерий, кислород-18 и тритий в термальных водах Южной Камчатки (распространенность и участие в процессах формирования вод) // Геохимия. 1982. № 2. С. 178–191.
- Стеллер Г.В.* Описание земли Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. Книжное изд-во, 1999, 288 с.
- Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов и И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Сывороткин В.Л.* Современный вулканизм Южной Камчатки и гидротермальный процесс // Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов и И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. С. 19–38.
- Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K. et al.* Nomenclature of pyroxenes // American Mineralogist. 1988. V. 73. P. 1123–1133.
- Deer W.A., Howie R. A., Zussman J.* An Introduction to the Rock-Forming Minerals. Harlow, Essex, England: New York, NY: Longman Scientific & Technical, 1992. 696 p.

## COMPOSITION OF ASH FROM THE 2017 KAMBALNY VOLCANO ERUPTION

S.N. Rychagov, E.I. Sandimirova, A.V. Sergeyeva, I.A. Nuzhdaev

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

Based on the integrated investigation, the authors obtained data on granulometric, chemical and mineral composition of ashes from the March — April, 2017 Kambalny Volcano eruption. The data showed that the ash is resurgent, and it consists of the hydrothermally altered andesites from the Kambalny Ridge being the volcano bedding rocks. The authors suggest that the seismic build-up prior to the eruption and the 2017 explosive eruption were caused by the renewed gas-and-hydrothermal processes in the basement rocks of the Kambalny Ridge.

*Keywords:* Kambalny Ridge, Kambalny Volcano, explosive eruption, ash, composition.